МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 621.315.3: 621.316.99 10.23947/1992-5980-2017-17-3-117-127

Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов*

М. Н. Дубяго[1], Н. К. Полуянович[2], В. Х. Пшихопов[3]**

[1, 2, 3] Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Method of investigating thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and prediction of insulating materials***

M. N. Dubyago[1], N. K. Poluyanovich[2], V. Kh. Pshikhopov[3]**

[1, 2, 3] Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованиям термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах в соответствии с теорией теплопроводности для решения задач диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляционных материалов на основе цифрового регистратора, а также неразрушающего температурного метода.

Целью работы является совершенствование методов неразрушающей диагностики, а именно — разработка автоматизированной системы контроля состояния изоляции и расчетно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы. Предложены математические модели, описывающие послойное распределение температуры кабельной линии в соответствии с теорией теплопроводности, использующие дифференциальное уравнение Фурье. Создан обобщенный алгоритм работы регистратора контроля параметров силовых кабельных линий (СКЛ), реализующий метод неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. При этом исследовались различные нагрузочные режимы работы и функции изменения тока кабеля.

Результаты исследования. Разработаны математические модели и программное обеспечение для численного моделирования температурного поля в сечении кабеля в соответствии с теорией теплопроводности, учитывающие физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. Научно подтверждена адекватность разработанной упрощенной математической модели определения температуры наиболее нагретой точки изоляции жилы кабеля на основе измеренных значений температуры поверхности силового кабеля и температуры воздуха при различных изменениях действующего значения тока кабеля. Разработан и обоснован метод исследо-

Introduction. The investigation of thermal fluctuation processes in insulating materials in accordance with the thermal conductivity theory for solving the problems on diagnostics and forecasting the residual life of insulating materials on the basis of a digital recorder, as well as on the nondestructive temperature method, is described. The work objective is to improve the nondestructive diagnostics methods, namely, the development of an automated control system for the state of insulation, and a computational and experimental study.

Materials and Methods. Mathematical models that describe the layer-by-layer temperature distribution of the cable line in accordance with the theory of thermal conductivity using Fourier differential equation are proposed. A generalized algorithm for the operation of the PCL parameters monitoring recorder is created. It implements the technique of nondestructive testing of thermal fluctuation processes in PCL insulation materials. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions is carried out. At that, different charging modes of operation and functions of the cable current variation are investigated.

Research Results. Mathematical models and software for numerical simulation of the temperature field in the cable cross-section in accordance with the theory of thermal conductivity are developed. Physical properties of materials and the geometric dimensions of cable elements are considered. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions is made. The developed simplified mathematical model for determining the temperature of the most heated point of the cable core insulation on the basis of the measured values of the surface temperature of the power cable and the air temperature for various changes in the effective value of the cable current is validated. A

* Работа выполнена по гранту ВнГр-07/2017-15.

** E-mail: w_m88@mail.ru, nik1-58@mail.ru, pshichop@rambler.ru

*** The research is done on ВнГр-07/2017-15 grant.

вания термофлуктуационных процессов на основе использования послойно расположенных в СКЛ температурных датчиков, позволяющий объединить в одном измерительном средстве два метода контроля: прогнозирование развивающегося дефекта изоляции и неразрушающий контроль термофлуктуационных процессов силового кабеля. Предложенная математическая модель может быть использована в качестве базовой при расчете тепловых процессов силовых кабелей в режиме реального времени, поскольку ее адекватность подтверждена экспериментальными исследованиями.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке теории, методов диагностики и прогнозирования состояния изоляционных материалов в сложных распределенных системах при различных режимах работы.

method for investigating thermal fluctuation processes based on the layered temperature sensors in PCL is developed and justified. That makes it possible to combine two control techniques – prediction of the growing insulation defect and nondestructive testing of the thermal fluctuation processes of a power cable – in one measuring tool. The suggested mathematical model can be used as a base for calculating the thermal processes of power cables in real time mode, as its adequacy is confirmed by the experimental studies.

Discussion and Conclusions. The obtained results can be used in the development of the theory, methods of diagnostics and prediction of the insulating materials state in complex distributed systems under various operating conditions.

Ключевые слова: термофлуктуационные процессы, диагностика, прогнозирование, изоляционные материалы.

Keywords: thermal fluctuation processes, diagnostics, forecasting, insulating materials.

Образец для цитирования: Дубяго, М. Н. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 117–127.

For citation: M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich, V.Kh. Pshikhopov. Method of investigating thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and prediction of insulating materials. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 117–127.

Введение. Увеличение перетока электроэнергии в энергосистемах приводит к тому, что СКЛ используют на пределе их физических возможностей, следствием чего является пробой электрической изоляции [1]. Таким образом, вопросы обеспечения энергетической безопасности, а также повышения эффективности передачи электроэнергии выходят на первый план.

Важной характеристикой СКЛ является нагрузочная способность, определяемая тепловым режимом. По ней рассчитывается площадь поперечного сечения и пропускная способность СКЛ [2]. Ресурс изоляционных материалов зависит от таких параметров, как температура, ток, влажность [3]. СКЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) обладает высокими термоизолирующими свойствами. Поэтому пропускная способность и надежность в значительной степени зависят от температурного режима работы. Для решения указанной проблемы используется мониторинг температуры кабеля во время работы. Для исследования температурного поля в сечении СКЛ используется цифровой регистратор (рис. 1).

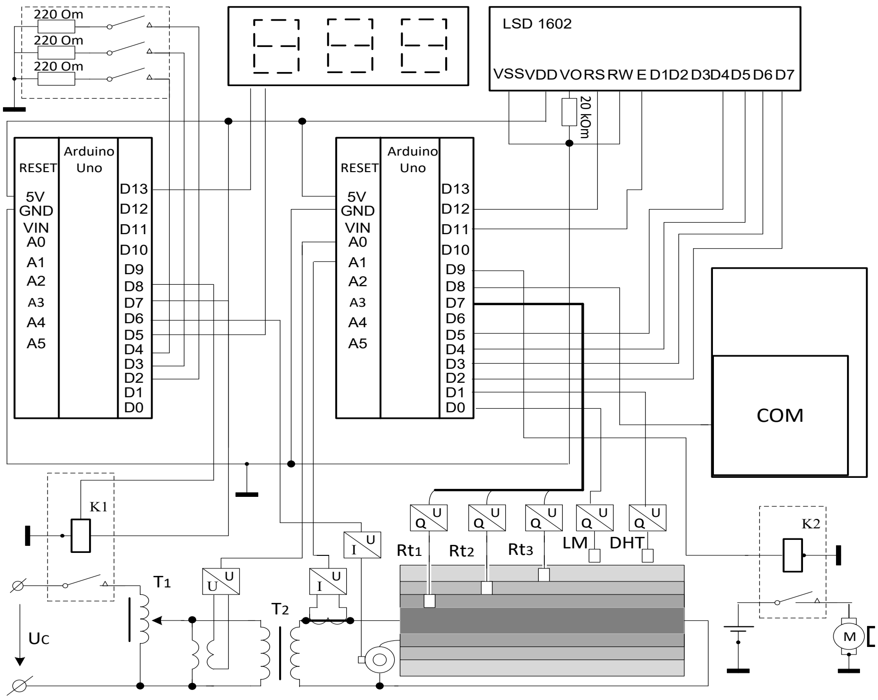


Рис. 1. Схема цифрового регистратора для проведения экспериментальных исследований

Fig. 1. Diagram of digital recorder for conducting experimental studies

Современные средства мониторинга распределенной по длине линии температуры не имеют подходящих для этого моделей и алгоритмов расчета тепловых процессов в изоляции кабеля [4].

Представленное исследование термофлуктуационных процессов основывается на методе регистрации температуры внутри изоляции. Распределенные оптоволоконные системы с установленными в пределах поперечного сечения СКЛ волоконнооптическими датчиками измеряют внутренние температуры для определения точек повышенного нагрева. Для исследования законов передачи температуры в лабораторных условиях решено применить послойное размещение датчиков (рис. 1).

При появлении частичного разряда (ЧР) в изоляционном материале рассеивается энергия, основная часть которой затрачивается на деструкцию изоляционного материала. Поэтому в месте действия ЧР осуществляется нагрев изоляции, что и является объектом измерения [5, 6]. Учитывая общие требования к системам измерения термофлуктуационных процессов и проблематику измерения, следует отметить, что существующие цифровые регистраторы не позволяют одновременно реализовать необходимый набор диагностических функций. Поэтому была использована система цифровой регистрации термофлуктуационных процессов, разработанная на кафедре электротехники и мехатроники (ЭиМ) Южного федерального университета (ЮФУ) [5].

Разработка алгоритма и системы мониторинга тепловых процессов СКЛ. Разработанная система измерения термофлуктуационных процессов сочетает в себе все достоинства современных цифровых измерительных систем, а именно:
— мониторинг тепловых процессов с помощью системы *SCADA* , реализованной в среде *LabVIEW*;
— мониторинг в режиме реального времени послойного измерения температуры;
— регулирование и измерение влажности и т. д. (рис. 1 [5]).

Исследование повышенного перегрева термофлуктуационным методом предусматривает использование в лабораторных экспериментах температурных датчиков, расположенных послойно в СКЛ (см. рис. 1), для создания моделей и алгоритмов расчета тепловых процессов в изоляции.

Таким образом, разработанная схема автоматизированной системы контроля состояния изоляции *SMaCTC*:
— позволяет независимо или совместно использовать два метода контроля (прогнозирования развивающегося дефекта изоляции и неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов);
— имеет набор диагностических функций по контролю режимов работы СКЛ (номинальной нагрузки, холостого хода, короткого замыкания) по результатам полученного профиля температур, снятых датчиками [5, 6].

Алгоритм работы программного обеспечения цифрового регистратора контроля параметров СКЛ представлен на рис. 2.

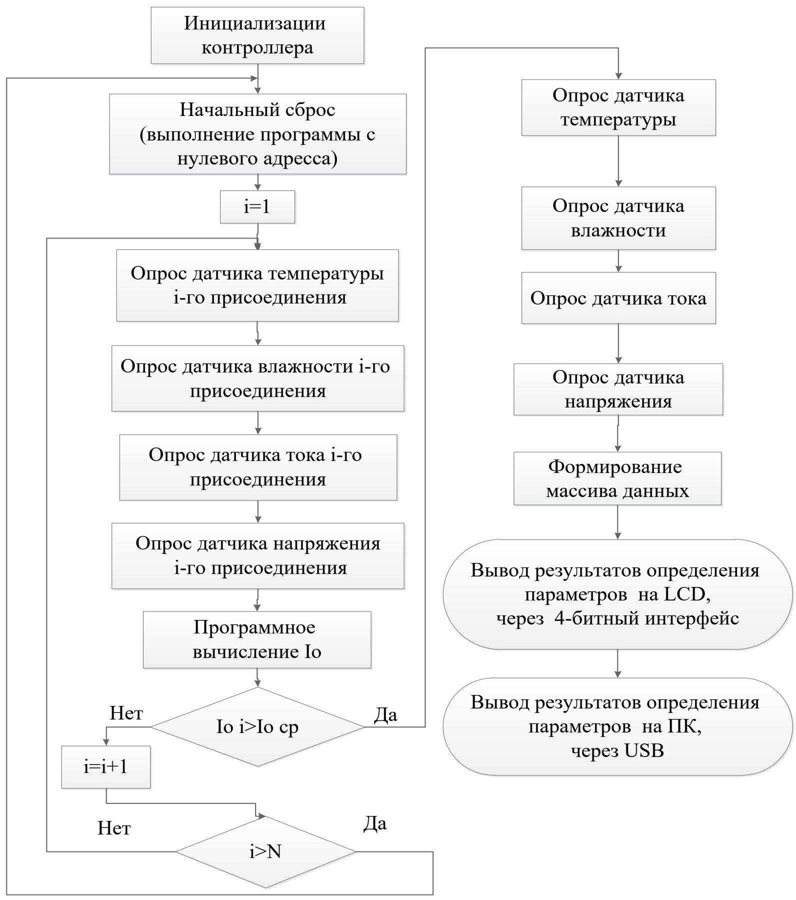


Рис. 2. Алгоритм функционирования регистратора контроля параметров СКЛ

Fig. 2. Algorithm of PCL parameters monitoring recorder operation

Таким образом, обобщенный алгоритм:
— во-первых, позволяет управлять процессом диагностики параметров СКЛ;
— во-вторых, эффективно реализует метод контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ посредством цифрового регистратора.

Моделирование термопроцессов изоляции СКЛ с использованием пакета *LabVIEW*. Для исследования термофлуктуационных процессов в СКЛ создан виртуальный инструмент *LabVIEW*, который:
— позволяет взаимодействовать с измерительными датчиками и управляющей аппаратурой;
— осуществляет сбор, обработку, отображение информации и результатов расчета;
— моделирует как отдельные объекты, так и цифровую систему *SMaCTC* в целом.

Вид панели виртуального инструмента представлен на рис. 3.

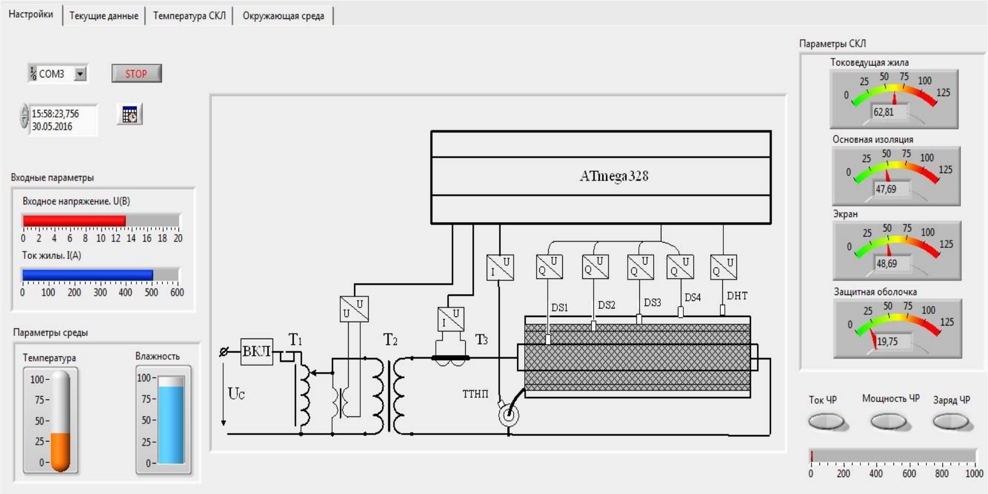


Рис. 3. Панель виртуального инструмента *LabVIEW*

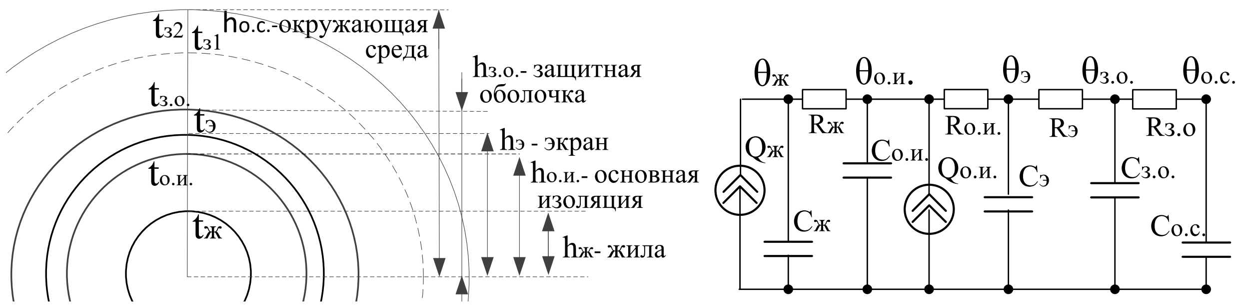
Fig. 3. Virtual toolbar LabVIEW

Стенд для исследования термофлуктуационных процессов представляет собой компьютерную модель *LabVIEW* на рабочем столе персонального компьютера и содержит модели виртуального инструмента:
— данные и графики температур;
— данные и зависимости влажности;
— анализ и средние данные температур;
— временную зависимость тока [6].

Программное обеспечение позволяет рассчитывать значения тока, напряжения, температуры жилы кабеля, влажности, тока нулевой последовательности ($I_{ТНП}$) с интервалом времени 1 с.

Таким образом, создана автоматизированная система контроля характеристик изоляционных материалов *SMaCTC*, позволяющая контролировать термофлуктуационные процессы СКЛ напряжением 10 кВ. При этом используется метод неразрушающего контроля термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах СКЛ. Специальное программное обеспечение снимает информацию о работе *SMaCTC*.

Мониторинг тепловых условий кабеля и окружающей среды. Для исследования тепловых режимов СКЛ использовались математические и имитационные модели силового кабеля с СПЭ [6, 7, 8, 9]. В этом случае кабель и окружающая среда разбиваются на зоны, представленные в виде электрической схемы замещения (рис. 4).



a) *b*)

Рис. 4. Сечение кабеля (*a*) и его эквивалентная тепловая схема замещения (*b*)

Fig. 4. Cable cross-section (a) and its equivalent thermal replacement circuit (b)

Здесь $\theta_ж$, $\theta_э$, $\theta_{о.и.}$, $\theta_{з.о.}$, $\theta_{о.с.}$ — соответственно температуры на жиле, экране, основной изоляции, защитной оболочке, окружающей среде; $C_ж$, $C_э$, $C_{о.и.}$, $C_{з.о.}$, $C_{о.с.}$ — теплоемкости соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки, окружающей среды; $R_ж$, $R_э$, $R_{о.и.}$, $R_{з.о.}$— тепловые сопротивления соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки; $Q_ж$, $Q_{о.и}$— источники тока, замещающие температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану.

На рис. 4 показаны слои и точки, в которых проводится контроль тепловых параметров. Исследование распределения температуры кабельной линии выполнялось в соответствии с теорией теплопроводности, при этом использовалось дифференциальное уравнение Фурье [10].

Физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля АПвПу г-1х30/25-10 [5, 6] сведены в табл. 1 [11].

Таблица 1

Table 1

Параметры кабеля

Cable parameters

Материал / Параметр	Алюминий	СПЭ	Медь	Воздух
Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	209,3	0,38	400	0,024
Плотность, кг/м^3	2700	2200	8700	1,2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	920	1900	385	1005

Профиль температур в сечении силового кабеля (рис. 4) определялся системой уравнений в соответствии с теорией теплопроводности.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{о.с} + \left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi r\varkappa, (h = h_{о.с.}) \\ \theta(h_{о.с.}) + ln\left(\frac{r_{о.с.}}{h}\right)\left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi\lambda_{о.с}, (h_{з.о.} \le h \le h_{о.с.}) \\ \theta(h_{з.о.}) + ln\left(\frac{r_{з.о.}}{h}\right)\left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э}\right)/2\pi\lambda_{о.и.}, (h_э \le h \le h_{з.о.}) \\ \theta(h_э) + ln\left(\frac{h_э}{h}\right)\frac{\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} - \frac{\delta_э^2}{\gamma_э}h_{о.и.}^2\pi}{2\pi\lambda_э} + \frac{I_э^2(h_э^2 - h^2)}{4\lambda\gamma_э}, (h_{о.и.} \le h \le h_э) \\ \theta(h_{о.и.}) + ln\left(\frac{h_{о.и.}}{h}\right)\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж}/2\pi\lambda_{о.и.}, (h_ж \le h \le h_{о.и.}) \\ \theta(h_ж) + \delta_ж^2(h_ж^2 - h^2)/4\lambda_ж\gamma_ж, (0 \le h \le h_ж). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\lambda_{о.с.}, \lambda_{о.и.}, \lambda_э$, $\lambda_ж$, — удельные теплопроводности окружающей среды, полиэтилена, экрана и жилы соответственно; $I_ж, I_э$ — токи на жиле и экране; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности; $\delta_ж = I_ж/S_ж$; $\delta_э = I_э/S_э$; $S_ж, S_э$— площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_ж, \gamma_э$ — электропроводности жилы и экран.

В соответствии с системой уравнений (1) в *MatLab* строится профиль температур в сечении кабеля и окружающей среды [6, 12].

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры. Для доказательства адекватности предлагаемой упрощенной математической модели СКЛ авторы провели исследования, в ходе которых через кабель пропускался переменный ток, величина которого изменялась в зависимости от режима работы (рис. 5).

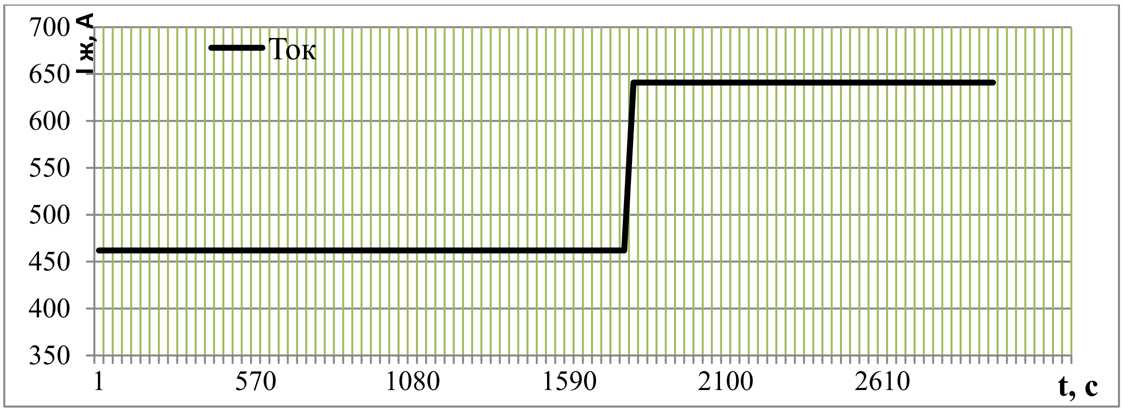


Рис. 5. Экспериментальная диаграмма тока в кабеле

Fig. 5. Experimental diagram of current in cable

В ряде работ [1, 6, 13] представлены модели, с помощью которых рассчитывается распределение температуры по слоям, а также зависимость, позволяющая определять температуру жилы ($\theta_ж$, °С).

Предлагается упрощенная аналитическая зависимость (2) определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жилы кабеля), полученная из системы (1). Температура жилы кабеля вычисляется с учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы:

$$\theta_ж(t) = \theta_{з.о.}(t) + \frac{n \cdot I^2 \cdot \rho_{20} \cdot m \cdot T_k \cdot K_\rho \left[1 + \alpha \cdot \left(\theta_{доп} - \theta_{о.с.}(t)\right)\right]}{S}. \quad (2)$$

В опытах использовался силовой кабель АПв Пу г-1х30/25-10.

Здесь $\theta_ж$ — расчетная температура жилы кабеля, °С; $\theta_{з.о.}$ = 23 °С — измеренная температура поверхности кабеля (защитная оболочка); n = 1 — число жил кабеля; I — максимальный ток кабеля при проведении измерений, А; $\rho_{20} = 2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м — удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °С; T_k = 0,0028 °С, м/Вт — сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля; m — экспериментальный множитель; K_ρ = 1,02 — поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре; α = 0,0043081 °С — температурный коэффициент сопротивления материала жилы [7]; $\theta_{доп}$ = 90 °С — длительно допустимая температура изоляции жилы; $\theta_{о.с.}$ = 23 °С — измеренная температура окружающей среды; S = 0,0038465 — сечение жилы кабеля, м^2.

Итак,

$$\theta_ж(t) = \theta_{з.о.}(t) + \frac{1 \cdot I^2 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}0028 \cdot 1{,}02\left[1 + 0{,}004308 \cdot \left(90 - \theta_{о.с.}(t)\right)\right]}{3{,}8465 \cdot 10^{-3}}.$$

Основное назначение уравнения (2) — рассчитать температуру жилы кабеля максимально просто. Уравнение учитывает лишь стационарные тепловые процессы в кабеле и справедливо при установившихся значениях измеряемых величин. Это характерно и для всех нормативных документов по расчету тепловых процессов в силовых кабелях: МЭК (1ЕС) 60287, ГОСТ Р МЭК 60287-1-1, ГОСТ Р МЭК 60287-1-2, ГОСТ Р МЭК 60287-1-3, ГОСТ Р МЭК 60287-2-1, ГОСТ Р МЭК 60287-2-2.

При эксплуатации вполне естественно, что измеряемые величины изменяются во времени, таким образом, для их учета необходимо вести расчет нестационарных тепловых процессов.

Эксперимент 1. Экспериментальная диаграмма ступенчатого изменения действующего значения тока кабеля приведена на рис. 5. Экспериментальные и расчетные временные зависимости процесса нагрева кабеля, выражение (2), построенные при ступенчатом изменении тока, приведены на рис. 6.

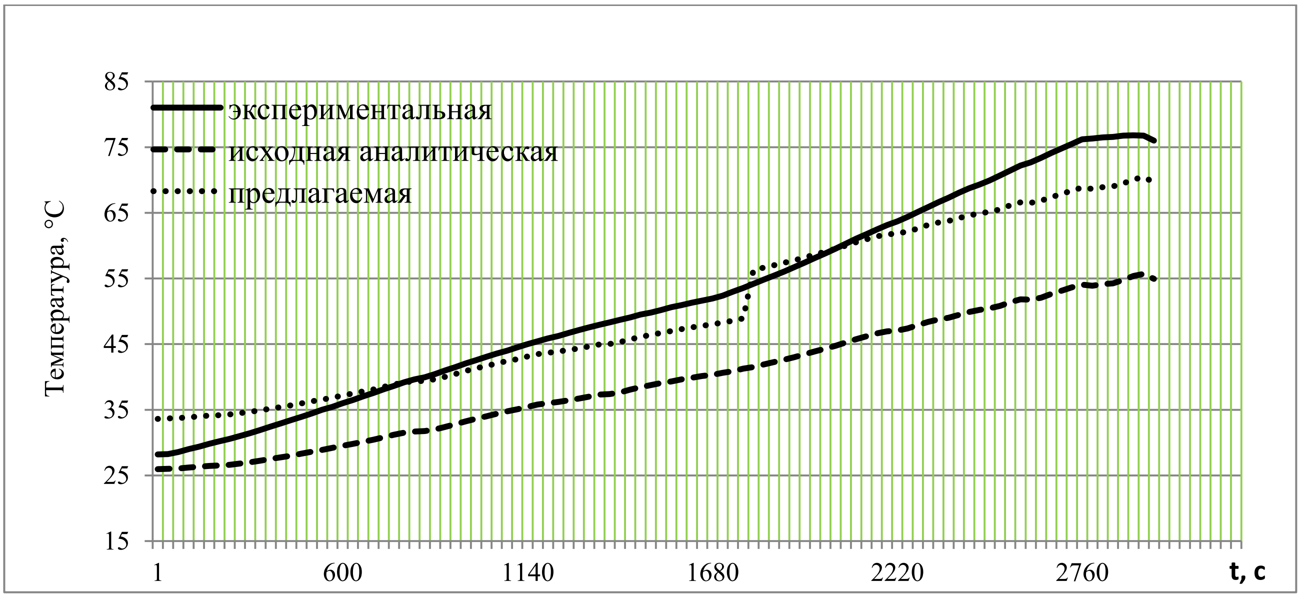


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные временные зависимости процесса нагрева кабеля

Fig.6. Experimental and calculated time dependences of cable heating process

В результате экспериментальных исследований получены показатели качества предложенной математической модели тепловых процессов силового кабеля:

— относительная погрешность модели не превышает 11 %;

— среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от расчетных по модели не превышает 4,5 °С.

Не учтено влияние теплообмена через торцы исследуемого кабеля в исходной модели. Во время проведения эксперимента торцы жилы не были закрыты теплоизолирующей тканью, и происходил теплообмен с держателями.

Из-за малой длины образца этот теплообмен оказал влияние на результат. Приведенные диаграммы демонстрируют корреляцию экспериментальных и расчетных кривых температуры, что говорит о верном выборе математической модели [2, 4].

Эксперимент 2. Для проверки адекватности разработанной математической модели на основе мощного понижающего трансформатора с выходным током до 640 А была создана измерительная система (рис. 1), позволяющая исследовать тепловые процессы в одножильных кабелях. Датчики температуры послойно размещались внутри и на поверхности СКЛ, а также на некотором удалении от него. Значение тока определялось посредством измерительного трансформатора. Все измерения проводились с помощью цифрового регистратора, подключенного к компьютеру. В качестве образца использовались отрезки заведомо исправных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10 длиной 0,85 м. Экспериментальная диаграмма действующего значения тока приведена на рис. 7.

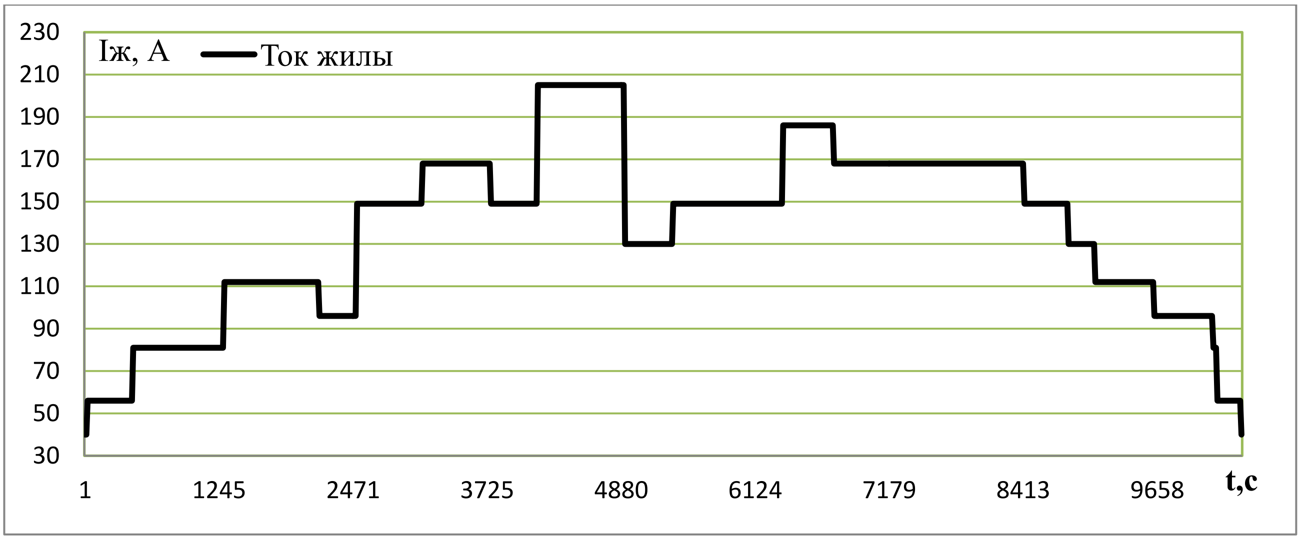


Рис. 7. Экспериментальная зависимость для действующего тока СКЛ

Fig. 7. Experimental dependence for PCL rms current

На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные временные диаграммы температуры кабеля АПв Пу г-1х30/25-10 по опыту, представленному в рис. 7.

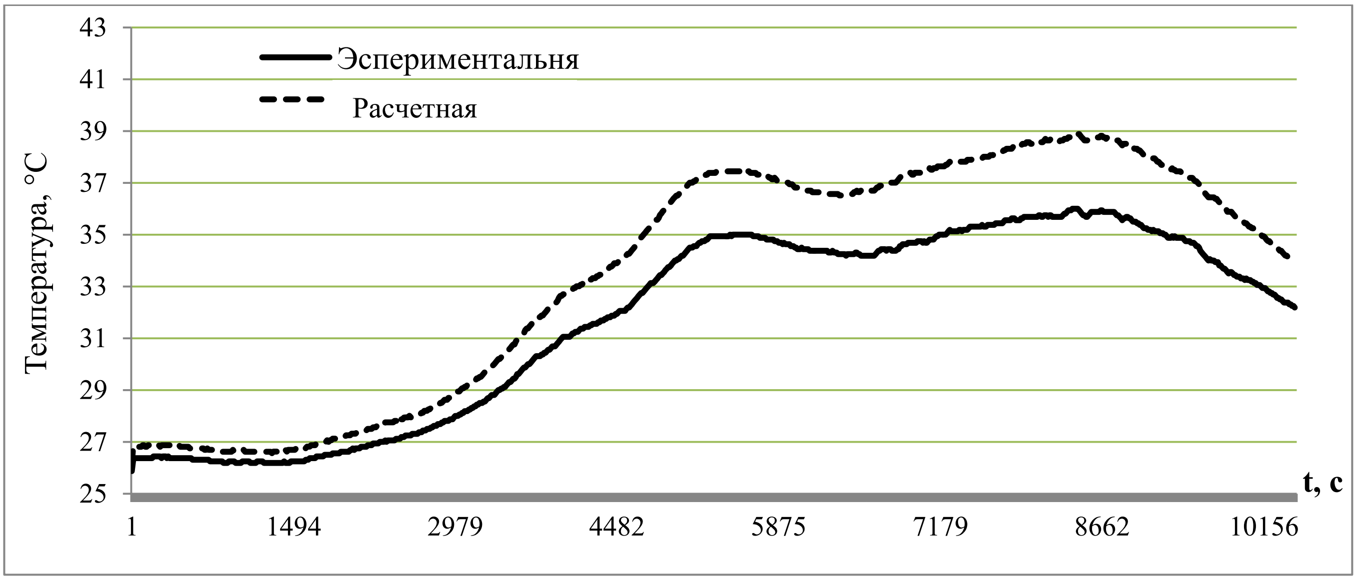


Рис.8. Временные диаграммы температуры на жиле кабеля АПв Пу г-1х30/25-10

Fig.8. Temperature time diagrams at cable core APv Pu g-1x30 / 25-10

Расчет показателей качества тепловой модели СКЛ. Введем показатели качества тепловой модели для анализа и оценки погрешностей расчета температуры по рассматриваемым тепловым моделям [14].

Пусть $(\Delta\theta)_j$ — абсолютная погрешность расчета температуры жилы на интервале расчета (или измерения) j. То есть

$$(\Delta\theta)_j = \left(\theta_р\right)_j - (\theta_э)_j,$$

где j — номер интервала расчета.

В качестве показателя качества будем рассматривать величину

$$\Delta\theta_{МАКС} = max\left\{\left|(\Delta\theta)_j\right|\right\}.$$

Погрешность $\Delta\theta_{МАКС}$ характеризует диапазон точности тепловой модели, то есть границы, в которых могут находиться значения величин $(\Delta\theta_ж)_j$.

Рассмотрим также средние значения векторов $(\Delta\theta_и)_j$ и $\left(\Delta\theta_р\right)_j$ как показатель качества тепловой модели:

$$\Delta\bar{\theta}_р = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\Delta\theta_р\right)_j\right]}{n},$$

$$\Delta\bar{\theta}_э = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[(\Delta\theta_э)_j\right]}{n},$$

где n — количество интервалов на расчетном промежутке времени.

Величины $\Delta\bar{\theta}_р$ и $\Delta\bar{\theta}_э$ характеризуют ошибки расчета температуры жилы в статике, то есть по постоянной составляющей. Для анализа качества тепловой модели в динамике будем рассчитывать коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\theta_р(j) - \bar{\theta}_р\right) - \left(\theta_э(j) - \bar{\theta}_э\right)\right]}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left[\theta_р(j) - \bar{\theta}_р\right]^2 \cdot \sum_{j=1}^{n}[\theta_э(j) - \bar{\theta}_э]^2}},$$

где

$$\Delta\bar{\theta}_р = \frac{\sum_{j=1}^{n}\theta_р(j)}{n}, \Delta\bar{\theta}_э = \frac{\sum_{j=1}^{n}\theta_э(j)}{n}.$$

Обсуждение и заключения. Результаты расчета показателей качества математической модели по эксперименту 1, полученные путем сравнения измеренной и расчетной температуры кабеля, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Показатели качества тепловой модели при ступенчатом изменении тока

Thermal model quality parameters under stepwise current variation

Показатели точности расчета	Значения погрешности по формуле	
	стандартной	предлагаемой
Диапазон точности $\Delta\theta_{МАКС}$	22,419	7,657
Показатель качества (среднее значение векторов)	12,114	1,559
Коэффициент корреляции	0,822	0,988
Максимальная относительная погрешность, %	29	10
Среднеквадратическое отклонение	14,96	12,29

Полученные высокие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о соответствии математической модели реальным тепловым процессам. Максимальная абсолютная погрешность при сравнении экспериментальных данных и расчетов по исходной формуле (рис. 6) составила 22,4 °C. Максимальная абсолютная погрешность при сравнении экспериментальных данных и расчетов по предлагаемой формуле (рис. 6) составила 7,6 °C.

Результаты расчета показателей качества математической модели по эксперименту 2, полученные путем сравнения измеренной и расчетной температуры кабеля, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Значения показателей качества тепловой модели

Thermal model quality parameters values

№ пп.	Показатели точности расчета	Погрешность по результатам расчета
1	Диапазон точности $\Delta\theta_{МАКС}$	2,9
2	Среднее значение векторов	1,8
3	Коэффициент корреляции	0,999
4	Максимальная относительная погрешность, %	5,4

Максимальная абсолютная погрешность расчета температуры по отношению к непосредственно измеренной температуре не превысила 2,9 °С. Высокие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о соответствии математической модели реальным тепловым процессам.

Предложенная аналитическая зависимость может применяться в качестве базовой при вычислении тепловых процессов СКЛ в режиме реального времени, так как ее адекватность подкреплена опытными данными.

Выводы. Исследования показали, что разработанные расчетные соотношения даже в условиях принятых упрощений достаточно корректно описывают тепловые процессы в кабеле. Применение рассмотренных устройств повысит эксплуатационную надежность систем электроснабжения. Основная область применения разработанной математической модели — диагностика и прогнозирование ресурса изоляции силового кабеля. Цифровое аппаратное устройство способно измерять температуры поверхности кабеля и окружающей среды, а затем в режиме реального времени рассчитывать внутренние температуры и решать задачи раннего выявления повреждений.

Работа выполнена по гранту № ВнГр-07/2017-15 «Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии».

Библиографический список

1. Макаров, Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Е. Ф. Макаров. — Москва : Папирус ПРО, 2004. — Т. 3. — 674 с.

2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Общие положения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2009. — 28 с.

3. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учеб. для вузов / Э. Т. Ларина. — Москва : Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.

4. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В. В. Беляков [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2008. — № 5. — С. 38–40.

5. Дубяго, М. Н. Мониторинг температуры силовых кабельных линий на ARDUINO / М. Н. Дубяго, В. С. Доценко, В. И. Данильченко // Сборник научных статей. Выпуск IX. — Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2015. — С. 134–139.

6. Dubyago, M. N. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory / M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich, D. V. Burkov // ICAEMM 2016 : International Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics. — Weihai, 2016. — P. 205-211.

7. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией / Д. И. Зализный [и др.] // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. — 2009. — № 3. — С. 65–75.

8. Навалихина, Е. Ю. Математическое моделирование процессов сложного тепломассопереноса в кабельном канале : дис. … канд. техн. наук / Е. Ю. Навалихина. — Пермь, 2015. — 109 с.

9. Sedaghat, A. Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations / A. Sedaghat, F. De León // IEEE Transactions on power delivery. — 2014. — Vol. 29, № 5. — P. 2306–2314.

10. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е. С. Зайцев [и др.] // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : Мат-лы V междунар. науч. конф. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. — С. 615–622.

11. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. — 304 с.

12. Dubyago, M. N. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration / M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich // AEECE 2015 : International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. — Changsha : Atlantis Press, 2015. — P. 49–54.

13. Дубяго, М. Н. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 7 (168). — С. 230–237.

14. Pivnev, V. V. Some the application of the Taylor series for the analysis of processes in non-linear resistive circuits / V. V. Pivnev, S. N. Basan // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 701/702. — P. 1173–1176.

References

1. Makarov, E.F. Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV. [Reference book on electrical networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV.] Moscow: Papirus PRO, 2004, vol. 3, 674 p. (in Rusian).

2. GOST R MEK 60287-1-1. Kabeli elektricheskie. Raschet nominal'noy tokovoy na-gruzki. Chast' 1-1. Uravneniya dlya rascheta nominal'noy tokovoy nagruzki i raschet poter'. Obshchie polozheniya. [GOST R MEK 60287-1-1. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General.] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2009, 28 p. (in Rusian).

3. Larina, E.T. Silovye kabeli i vysokovol'tnye kabel'nye linii. [Power cables and high-voltage cable lines.]. Moscow: Energoatomizdat, 1996, 464 p. (in Rusian).

4. Belyakov, V.V., et al. Monitoring silovykh kabel'nykh liniy s adaptatsiey k usloviyam okruzhayushchey sredy v rezhime real'nogo vremeni. [Monitoring of power cable lines with adaptation to environmental conditions in real-time mode.] ELEKTRO. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2008, no. 5, pp. 38–40 (in Rusian).

5. Dubyago, M.N., Dotsenko, V.S., Danilchenko, V.I. Monitoring temperatury silovykh kabel'nykh liniy na ARDUINO. [Monitoring of power cable lines temperature on ARDUINO.] Coll.of sci.papers. Iss.IX. Rostov-on-Don: SFU Publ. Centre, 2015, pp. 134–139 (in Rusian).

6. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N. K., Burkov, D.V. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory. ICAEMM 2016: International Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics. Weihai, 2016, pp. 205-211.

7. Zalizny, D.I., et al. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v silovykh kabelyakh s plastmassovoy izolyatsiey. [Mathematical modeling of thermal processes in power cables with plastic insulation.] Vestnik of GSTU after P.O.Sukhoy, 2009, no. 3, pp. 65–75 (in Rusian).

8. Navalikhina, E.Y. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v silovykh kabelyakh s plastmassovoy izolyatsiey. [Mathematical modeling of processes of complex heat and mass transfer in the cable channel: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Perm, 2015, 109 p. (in Rusian).

9. Sedaghat, A., De León, F. Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations. IEEE Transactions on power delivery, 2014, vol. 29, no. 5, pp. 2306–2314.

10. Zaitsev, E.S., et al. Modelirovanie teplovykh protsessov v kabele s izolyatsiey iz sshitogo polietilena sredstvami Matlab i Simulink. [Modeling of thermal processes in cable with XLPE insulation by means of Matlab and Simulink.] Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozheniy v srede MATLAB : Mat-ly V mezhdunar. nauch. konf. [Designing of engineering and scientific applications in MATLAB environment: Proc. V Int. Sci. Conf.] Kharkov: NTU «KhPI », 2011, pp. 615–622 (in Rusian).

11. Bogoroditskiy, N.P., Pasynkov, V.V., Tareev, B.M. Elektrotekhnicheskie materialy. [Electrotechnical materials.] Leningrad: Energoatomizdat, 1985, 304 p. (in Rusian).

12. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. AEECE 2015: International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Changsha: Atlantis Press, 2015, pp. 49–54.

13. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K., Pshilhopov, V.Kh. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh lini.y [Assessment and forecasting the insulation of power cable lines.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2015, no. 7 (168), pp. 230–237 (in Rusian).

14. Pivnev, V.V., Basan, S.N. Some the application of the Taylor series for the analysis of processes in non-linear resistive circuits. Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 701/702, pp. 1173–1176.

Поступила в редакцию 15.08.2017
Сдана в редакцию 15.08.2017
Запланирована в номер 25.08.2017

Received 15.08.2017
Submitted 15.08.2017
Scheduled in the issue 25.08.2017

Об авторах:

Дубяго Марина Николаевна,
ассистент Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0582-2340
w_m88@mail.ru

Authors:

Dubyago, Marina N.,
teaching assistant of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0582-2340
w_m88@mail.ru

Полуянович Николай Константинович,
доцент кафедры «Электротехники и мехатроники», Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Пшихопов Вячеслав Хасанович,
директор Научно-исследовательского института робототехники и процессов управления Южного федерального университета (РФ, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ЮФУ, ИНЭП), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-2772
vhpshichop@sfedu.ru

Poluyanovich, Nikolay K.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Pshikhopov, Vyacheslav Kh.,
director of the Research and Development Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University (RF,347922 Taganrog, ul. Shevchenko, 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-2772
vhpshichop@sfedu.ru